

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

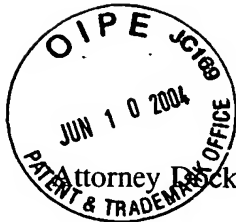
Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**



Attorney Docket # 5367-88

Patent

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Application of

Stephan LUTGEN et al.

Serial No.: 10/783,143

Filed: February 19, 2004

For: Optically Pumped Laser Device for  
Generating Laser Pulses

Mail Stop  
Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

LETTER TRANSMITTING PRIORITY DOCUMENT

SIR:

In order to complete the claim to priority in the above-identified application under 35 U.S.C. §119, enclosed herewith is a certified copy of the foreign application on which the claim of priority is based: Application No. 103 06 997.6, filed on February 19, 2003, in Germany.

Respectfully submitted,  
COHEN, PONTANI, LIEBERMAN & PAVANE

By Thomas Langer  
Thomas Langer  
Reg. No. 27,264  
551 Fifth Avenue, Suite 1210  
New York, New York 10176  
(212) 687-2770

Dated: June 8, 2004

## Beschreibung

Optisch gepumpte Halbleitervorrichtung zur Erzeugung kurzer  
Impulse

5

Die Erfindung bezieht sich auf eine neuartige  
Halbleiterlaservorrichtung zur Erzeugung kurzer Lichtimpulse  
im Pikosekunden- bis Femtosekunden-Bereich. Mit Vorteil  
stellt diese Halbleiterlaservorrichtung eine hocheffiziente  
10 Kurzpuls-Laserlichtquelle mit sehr guter Strahlqualität  
(TEM<sub>00</sub>) dar, die im Vergleich zu Kurzpuls-  
Festkörperlaserquellen (z.B. TiSa-Laser) eine kompakte  
Modulbauweise ermöglicht, da sie reine Halbleiter-Pump- und -  
Verstärkungselemente (Gainelemente) verwendet.

15

Ein für die Erfindung geeigneter lateral optisch gepumpter  
monolithisch integrierter Halbleiter-Scheibenlaser sowie  
dessen Leistungskalierung ist beispielsweise in WO 01/93386  
und WO 02/067393 detailliert beschrieben. Der Inhalt dieser  
20 beiden Druckschriften wird hiermit zum Inhalt der  
vorliegenden Patentanmeldung gemacht. Weiterhin bezieht sich  
die Erfindung auch auf extern gepumpte Halbleiter-  
Scheibenlaser.

25

Allgemein kann ein Kurzpulsbetrieb bei Festkörper- und  
Halbleiter-(Scheiben-)Lasern aktiv mit bekannten Techniken  
wie Gain Switching (Q-switching) erzielt werden, wobei die  
typischen Impulsdauern im Bereich von Mikrosekunden bis  
Nanosekunden liegen, in der Regel aber deutlich größer als  
30 1 ps sind. Durch passives Modelocking, z.B. mittels eines  
sättigbaren Absorbers, insbesondere eines sättigbaren  
Halbleiterabsorbers in Form eines sog. SESAMs (Semiconductor  
Saturable Absorber Mirror, SESAM) im Resonator können  
ultrakurze Impulse mit typischen Impulsdauern zwischen 0.5ps  
35 und 15ps (in der Regel unter 20ps) erzeugt werden.

Bei einem lateral optisch gepumpten monolithisch integrierten Scheibenlaser kann der Absorber ebenfalls monolithisch integriert auf dem Halbleiter-Scheibenlaser epitaktisch hergestellt werden. Impulsdauern bis zu 500fs mit einem SESAM als zusätzlichem Spiegel im externen Scheibenlaserresonator sind bereits in der Literatur demonstriert worden (S. Hoogland, S. Dhanjal, A. C. Tropper, J. S. Roberts, R. Häring, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, U. Keller, "Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser", IEEE PTL 12 (9) p.1135 (2000); Garnache, S. Hoogland, A. C. Tropper, I. Sagnes, G. Saint-Girons, J. S. Roberts, "Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100mW average power", APL 80 (21) p.3892-3894 (2002)).

Gegenstand der Erfindung ist unter anderem die Kombination eines sättigbaren Absorbers, extern oder monolithisch integriert, mit einem Halbleiter-Scheibenlaser, insbesondere einem monolithisch integrierten lateral optisch gepumpten Halbleiter-Scheibenlaser.

In Abb. 1 ist schematisch eine solche Kurzpuls-Resonator-konfiguration mit sättigbarem Absorber dargestellt.

Um zu kürzeren Impulsdauern im Bereich von  $t_p < 500\text{fs}$  (FWHM:  $\Delta\lambda = 2\text{nm}$  bei  $1000\text{nm}$  Zentralwellenlänge) gelangen zu können, ist aufgrund der Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GDD=Group Delay Dispersion, siehe Abb. 2) für eine kohärente Phasenkopplung der Moden innerhalb der Verstärkungsbandbreite eine Phasenkompensation der unterschiedlichen Laufzeiten der verschiedenen Frequenzen/Wellenlängen im Halbleiter notwendig. Für den fs-Impulsbetrieb des Lasers greift man auf das self modelocking als Spezialfall des passiven Modelockings, wie z.B. beim TiSa-Festkörperlaser, basierend auf SPM (Self-Phase-Modulation) und KLM (Kerr Lens Modelocking) zurück. Um den Laser vom cw- in den Puls-Betrieb zu zwingen, gibt es zum

Starten verschiedene Verfahren, wobei typischerweise sättigbare Absorber als Resonatorspiegel verwendet werden.

Die dieser Erfindung zugrundeliegende Idee beruht auf der Kombination von intracavity Phasenkompensationsmechanismen und einem Halbleiter-Scheibenlaser, bei dem der externe Resonator eine resonatorinterne Phasenkompensation zur Erzeugung kurzer Laserpulse, typischerweise im Bereich zwischen 1fs und 500fs, ermöglicht.

10

Das Design des Halbleiter-Scheibenlaser für kurze Pulse erfordert eine größere spektrale Bandbreite, die durch ein geeignetes AR-Coating erzielt werden kann. Das AR-Coating kann z.B. aus dielektrischen oder epitaktisch hergestellten Schichtfolgen bestehen. Dazu wird eine auf die aktive Schicht in Form einer RPG-Struktur folgende zusätzlichen Schichtfolge von typ. 3-6 Perioden  $\lambda/4$ -AlGaAs- Spiegelpaaren und einer  $\lambda/2$ -Abschlußschicht gebildet.

20

Die für eine solche Struktur berechnete wellenlängenabhängige Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GDD, rote Kurve) pro Umlauf im Halbleitermedium unter Reflexion am Braggspiegel ist in Abb. 2 aufgetragen. Im Vergleich dazu ist die berechnete Reflexions-/Gainkurve für eine unter Laserbetrieb typische Ladungsträgerdichte (gain=reflektion $\geq$ 100%) in Abb. 2 dargestellt (blaue Kurve). Für identische Quantenfilme innerhalb der RPG-Struktur ergibt sich eine Verstärkungsbandbreite von ca. 15nm (FWHM).

30

Für kurze Impulsdauern beobachtet man im Gegensatz zum quasikontinuierlichen Laserbetrieb mit sehr geringer Emissionslinienbreiten eine spektral breite Laseremission mit kohärenter Kopplung der unterschiedlichen Moden innerhalb der Verstärkungsbandbreite. Aus der Energie-Zeit-

35

Unschärferelation  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  folgt für eine typische sech<sup>2</sup>-Pulsform eine untere Grenze mit  $\Delta \nu \cdot \Delta t \geq 0.315$ . Für eine Verstärkungsbandbreite von 15nm folgt aus diesem

Bandbreitenprodukt eine untere Grenze für die Impulsdauer von ca.  $t_p \geq 70 \text{ fs}$ . Für kürzere Impulsdauern ist eine größere Verstärkungsbandbreite notwendig, die z.B. durch unterschiedliche Quantenfilme mit gain bei unterschiedlichen Wellenlängen realisiert werden kann. Der große Wellenlängenbereich, der in den typischen Halbleitermaterialsystemen, wie z.B. AlGaInN, InGaAlP, AlGaAs, InGaAsP, GaAsN, InGaAsN, GaSb, InGaSb, InP zugänglich ist, zeigt den großen Vorteil von fs-Halbleiter-Scheibenlasern gegenüber typischen fs-YAG-Festkörper-Scheibenlasersystemen mit stark eingegrenztem Wellenlängenbereich und entsprechender Impulsdauer.

Aus Abbildung 2 ergibt sich für eine typische Kurzpuls-Halbleiter-Scheibenlaser-Struktur eine Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GDD) von etwa  $3200 \text{ fs}^2$  in Reflexion pro Resonatorumlauf. Dieser wellenlängenabhängige Phasengang (Chirp) kann in einen linearen Phasengang (grüne gerade Linie) und in einen Phasengang höherer Ordnungen (grüne Kreise) unterteilt werden. Für einen effizienten fs-Betrieb ist unter Ausnutzung der vollen Verstärkungsbandbreite des Halbleiter-Scheibenlasers eine resonatorinterne Phasenkompensation notwendig.

Im folgenden werden Phasenkompensationsmechanismen und deren Einsatz in typischen Resonatorkonfigurationen, teilweise in Kombination mit einem SESAM zur Unterdrückung eines cw-Betriebs beschrieben. Der cw-Betrieb kann damit allein oder in Kombination unter Ausnutzung der unterschiedlichen Linsen für cw- und Kurzpuls-Betrieb im VECSEL-Gainelement durch geringfügige Defokussierung des Fokalspiegels auf das Gainelement unterdrückt werden. Weiterhin wird eine Kombination mit nichtlinear optischen Medien für resonatorinterne und -externe Frequenzkonversion beschrieben.

Für die genannten unterschiedlichen Linsen kommen beispielsweise thermische Linsen oder Kerr-Linsen in

Betracht. Letztere bilden die Grundlage für das sogenannte Kerr-Lens-Modelocking. Das Prinzip des Kerr-Lens-Modelockings (KLM) im aktiven Medium beruht auf der Brechungsindexänderung durch das räumliche Intensitätsprofil des Lichtimpulses, da  
 5 der Brechungsindex neben der Wellenlänge und Temperatur auch von der Intensität abhängt:

$$n(\lambda, T, I) = n_0(\lambda, T) + n_2(\lambda, T) * I$$

10 In Abbildung 3 ist schematisch ein Kurzpuls-Scheibenlaserkonzept mit resonatorinterner Phasenkompensation für Impulsdauern <500fs dargestellt. Als Modul 1 wird das Verstärker(RPG=resonant periodic gain)- und Spiegel(Bragg)-element des epitaktisch hergestellten Halbleiter-  
 15 Scheibenlasers bezeichnet, welches durch unterschiedliche Pumpmechanismen optisch gepumpt werden kann:

1. Extern vertikal optisch Spacer- und/oder QW-gepumpter Halbleiter-Scheibenlaser (wie in Abb. 1 dargestellt),  
 20 teilweise auch als VECSEL bezeichnet.
2. Hybrid montierter Pumplaser, der den Halbleiter-Scheibenlaser lateral optisch pumpt. Dabei werden typisch nur die QWs optisch gepumpt.
3. Monolithisch integriertes Pumplaserkonzept (MILOS-Disklaser), bei dem der Halbleiter-Scheibenlaser  
 25 (typischerweise dessen QWs) lateral optisch gepumpt wird.
4. Jedes andere optische und elektrische Pumpkonzept für den Scheibenlaser.

30

Die Phasenkompensation innerhalb des Resonators erfolgt durch bekannte Phasenkompensationsmechanismen, in Abbildung 3 als Modul 2 bezeichnet, die u.a. auch aus jeder Kombination der nachfolgend beschriebenen Phasenkompensationsmechanismen  
 35 bestehen und zur linearen Phasenkompensation in erster und auch höherer Ordnung dienen kann:

1. Chirped Mirror
2. Prismen-Phasenkompensation
3. Gitter-Phasenkompensation
4. Linsen+Spiegelkombination-Phasenkompensation
- 5 5. Faser- und Gitterfaserkompensation
6. Jede beliebige Kombination von 1)-5) oder jede andere Phasenkompensationsmechanismen

10 In Abbildung 4 ist eine andere Ausführungsform für einen fs-Halbleiterscheibenlasers dargestellt. Der Nachteil von zusätzlichen optischen Elementen, insbesondere von Prismen innerhalb des Resonators sind größere Verluste durch Streuung an Oberflächen, die sich durch einen größeren Roundtrip-Loss nachteilig auf die Laserleistung auswirken.

15 Vorteilhafter ist die in Abbildung 5 dargestellte Resonatorkonfiguration mit einem Chirped Mirror zur Phasenkompensation auch höherer Ordnung als reflektives Element mit sehr guter Oberflächenqualität.

20 Eine weitere Ausführungsform der Erfindung ist eine Anordnung mit zwei Resonatorästen, in denen unterschiedliche Wellenlängen innerhalb der Verstärkungsbandbreite des Halbleiterscheibenlasers selektiert und somit der Laser gleichzeitig auf zwei oder mehreren Laserwellenlängen läuft. Eine entsprechende Anordnung ist in Figur 6 gezeigt.

30 Als dispersives Medium für die Wellenlängenaufspaltung kann typischerweise ein Prisma, Gitter oder Fasergitter verwendet werden. Aus dem spektral aufgeweiteten Strahl können verschiedene Resonatoräste z.B. mit Spalt/Spiegel-Kombination zur Wellenlängenselektion eingesetzt werden und so ein cw-Zweifarb-Halbleiterscheibenlaser konstruiert werden. Solche abstimmbaren cw-Zweifarb-Laser können u.a. zur

35 Differenzfrequenzerzeugung genutzt werden und damit eine kostengünstige cw-Laserlichtquelle vom MIR- bis THZ-Bereich darstellen.



Dieses Konzept kann ähnlich auch für einen fs-Zweifarbenn-Halbleiter-Scheibenlaser angewendet werden. Dazu müssen, wie in Abbildung 7 dargestellt, innerhalb der beiden

5 Resonatoräste die GDDs kompensiert werden. Der Vorteil liegt in dem geringen Jitter (typ.  $<2\text{fs}$ ) der beiden fs-Strahlen und kann effizient für einfache externe Frequenzkonversion (z.B. SFG, DFG) genutzt werden.

10 Weitere Anwendungen der Erfindung:

Impulsdauern von 10-100 fs sind für effiziente externe Frequenzkonversion, beispielsweise im Rahmen sog.  $\chi^2$ -Prozesse wie Summen- und Differenzfrequenzerzeugung, sog.  $\chi^3$ -Prozesse wie beispielsweise Ramanprozesse, Frequenzverdreifachung, 15 sowie Prozesse höherer Ordnung wie Frequenzvervierfachung und die Erzeugung höherer Harmonischer etc., in nichtlinear optischen Medien (z.B. LBO-Kristalle, BBO-Kristalle, GaAs-, GaN-Oberflächen etc.) bei typischen Leistungen von 0.01-10W notwendig und sind z.B. bei TiSa-Festkörperlasern Stand der 20 Technik. Durch die hohe Impulsleistung ist die Realisierung einer einfachen Weißlichtquelle durch Kontinuumsenerzeugung, z.B. externe Fokussierung in Wasser, Glas, Saphir, BaF etc. möglich. Des weiteren können weitere up- and down-Konverterstoffe (Leuchtstoffe / Phosphore) für andere Wellen- 25 längen genutzt werden.

Ein weiterer Vorteil des Halbleiter-Scheibenlasers besteht darin, daß die Kombination von unterschiedlichen Quantenwellen mit unterschiedlichen Gainspektren zu einer spektralen

30 Verbreiterung des nutzbaren Gains möglich ist. Damit kann

1. ein weiterer Abstimmbereich des Halbleiter-Scheibenlasers im cw-Betrieb,
2. eine abstimmbare ps-fs und/oder kürzere fs-Impulsdauer innerhalb des Bandbreitenprodukts, oder

35 3. ein geeignetes temperaturunabhängiges Verhalten von Schwelle und Steilheit des Halbleiter-Scheibenlasers erreicht werden.

Weiterhin eignet sich die Erfindung auch zur Realisierung von effizienten cw- und Kurzpuls-Halbleiter-Verstärkerkonzepten (z.B. chirped puls amplification, CPA-Konzept), die  
5 beispielsweise bei bei TiSa-Festkörperlasern verwendet und die hier nicht weiter beschrieben werden. Im Rahmen der Erfindung wird vorgeschlagen, einen erfindungsgemäßen optisch gepumpten Halbleiterscheibenlaser mit einem CPA-Verstärker zu kombinieren.

Patentansprüche

1. Laservorrichtung zur Erzeugung kurzer Impulse mit einem  
extern oder monolithisch integriert optisch gepumpten  
5 Halbleiterscheibenlaser und einem sättigbaren Absorber.
2. Laservorrichtung zur Erzeugung kurzer Impulse mit einem  
extern oder monolithisch integriert optisch gepumpten  
Halbleiterscheibenlaser und einem Resonator; der eine  
10 Vorrichtung zur Phasenkompensation umfaßt.

Abbildung 1: Kurzpuls-Scheibenlaserkonzept mit sättigbarem Absorber (SESAM) für typische Impulsdauern von  $t_p > 500\text{fs}$ .

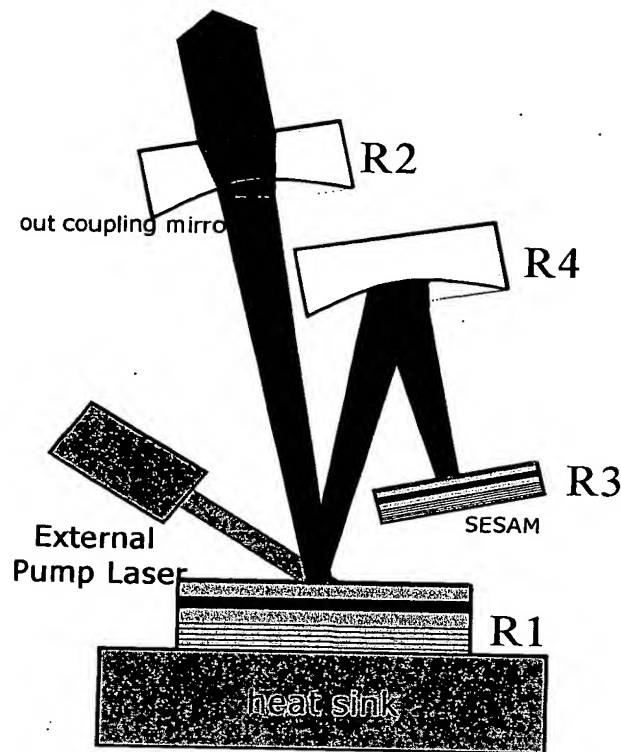


Abbildung 2: Gerechneter Phasengang GDD (rote Kurve) in Reflektion und typische Verstärkungsbandbreite (Reflektion  $>100\%$ , blaue Kurve) eines für den Kurzpuls-Betrieb optimierten Halbleiter-Scheibenlasers mit AR-Coating.

fs-AR-VECSEL-QW-995nm-gain: Reflectance Group Delay Dispersion

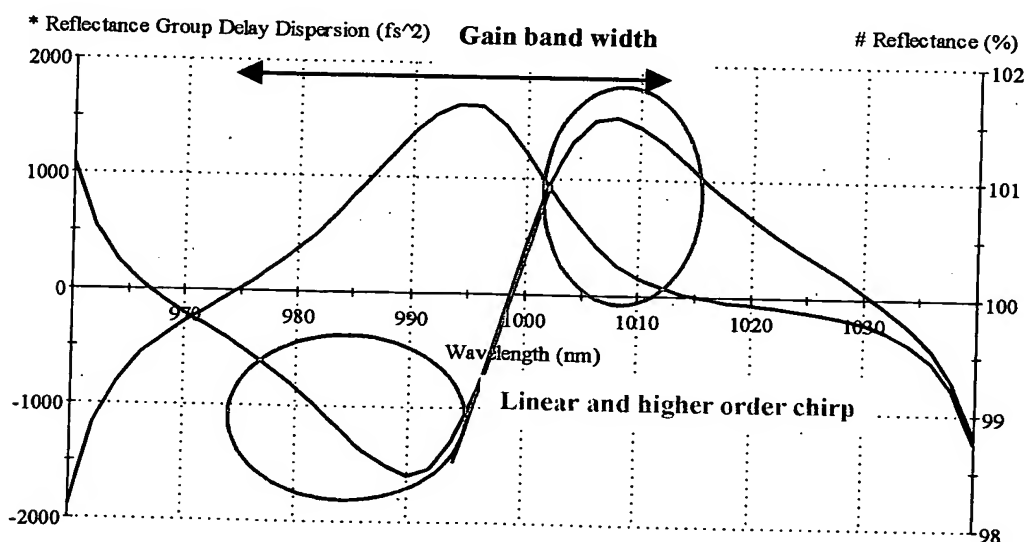


Abbildung 3: Schematische Aufbau eines Halbleiter-Scheibenlaserkonzepts zur Erzeugung kurzer Lichtimpulse mit intracavity Phasenkompensationsmechanismen.

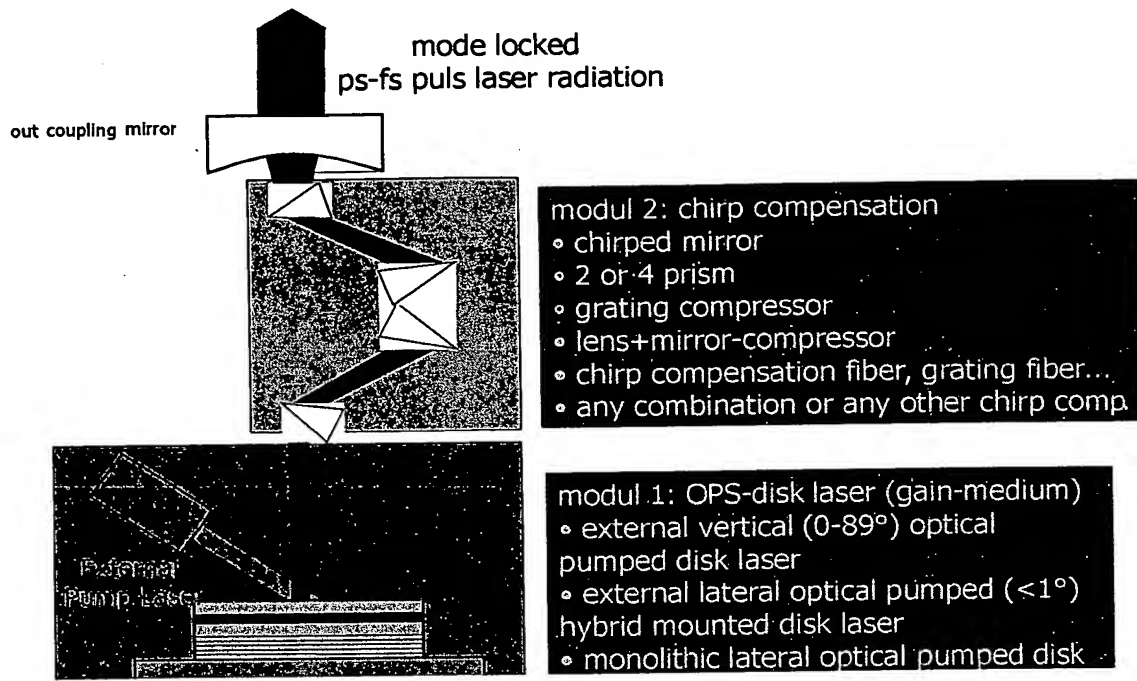


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines fs-Halbleiterscheibenlaser mit resonatorinterner Phasenkompensation.

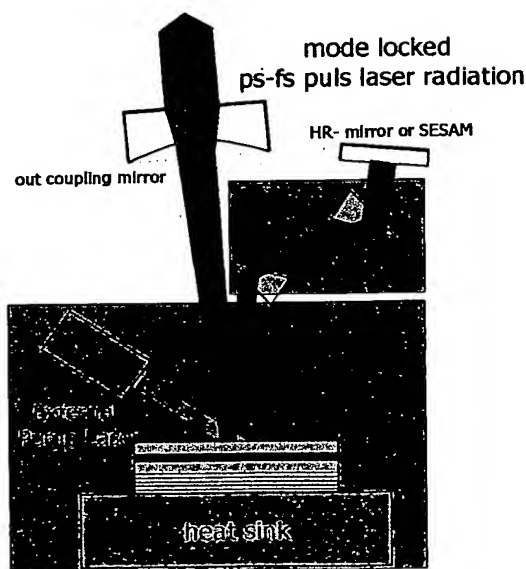


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines fs-Scheibenlasers mit einem Chirped Mirror für eine resonatorinterne Phasenkompensation auch höherer Ordnung und optional einem SESAM zur Unterdrückung eines möglichen cw-Betriebs.

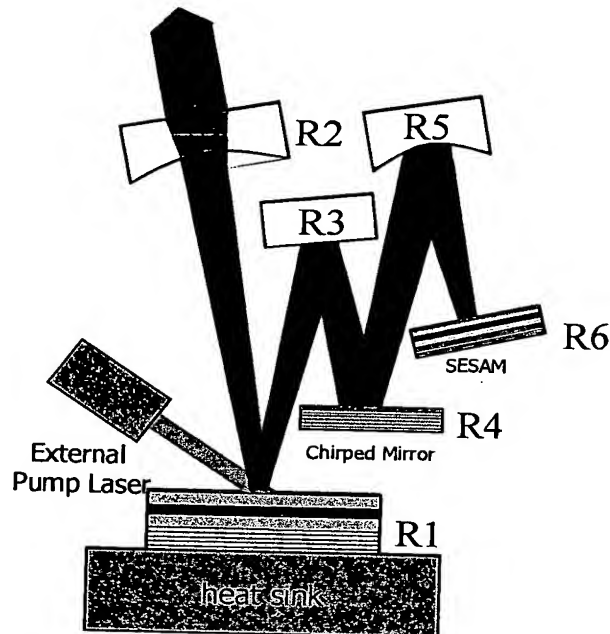


Abbildung 6: Schematische Aufbau eines cw Zwei-Farben-Halbleiterscheibenlasers

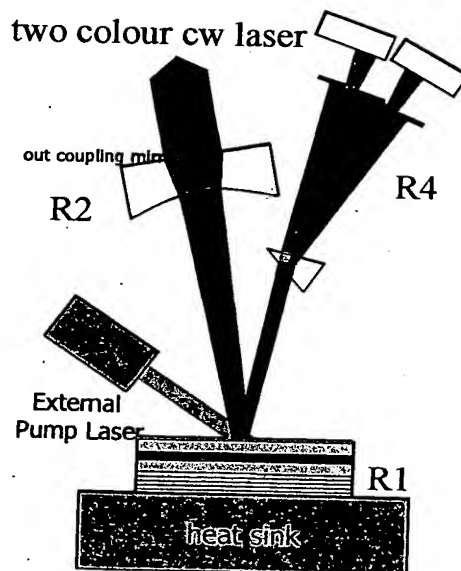
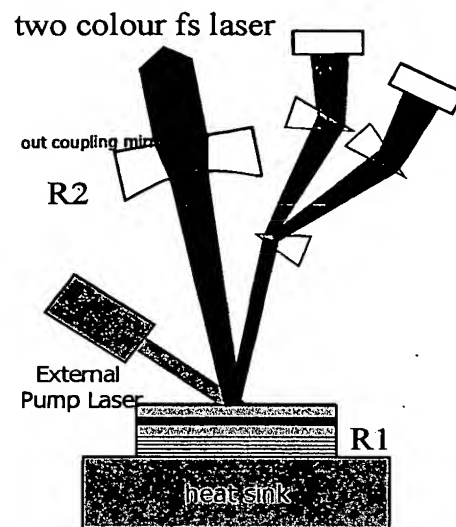


Abbildung 7: Schematische Aufbau eines Zwei-Farben fs-Halbleiterscheibenlasers

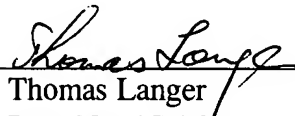


- ☒ Recordation cover sheet - PTO Form 1595
- ☒ Check in the amount of \$40.00 to cover the recordation fee
- ☒ Five (5) Sheets for Formal Drawings (Figs. 1-10)
- ☒ Copy of Notice to File Missing Parts of Nonprovisional Application

If an extension of time to respond to this Notice To File Missing Parts of Application is required, then this paper also constitutes an express request for such an extension of time.

In the event that any additional fees or charges are deemed necessary in connection with the application at the present time, the same may be charged to our Patent and Trademark Office Deposit Account No. 03-2412.

Respectfully submitted,  
COHEN, PONTANI, LIEBERMAN & PAVANE

By:   
Thomas Langer  
Reg. No. 27,264  
551 Fifth Avenue  
New York, New York 10176  
(212) 687-2770

Dated: 8 June 2004